

DOI: 10.7511/jslx20201016001

# 考虑瞬态效应的承载隔热多功能结构拓扑优化

吴书豪, 张永存, 刘书田\*

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

**摘要:** 同时满足承载和隔热要求的多功能结构在高超飞行器热防护结构设计中倍受关注。实际隔热材料通常承载能力弱, 而高承载材料隔热性能差, 如何在有限空间内协同结构的承载与隔热成为关键问题。高超飞行器气动加热时间有限, 存在加热时间短、热荷载变化大的特点。因此结构设计需要考虑时间因素和瞬态效应, 而现有稳态传热与承载的多功能协同优化设计模型无法解决上述问题。为此, 本文建立了考虑瞬态效应的承载隔热多功能结构拓扑优化的设计模型和求解方法, 给出了目标和约束的解析敏感度计算格式。该方法以密度法为基础, 考虑体积约束, 通过以结构柔顺性最小为设计目标, 同时以区域温度控制函数为设计约束, 实现结构刚度与隔热多功能设计要求。具体的算例表明, 本文提出的优化模型能够准确考虑结构的瞬态效应, 实现在给定许用温度和工作时间条件下隔热和承载的多功能协同设计。

**关键词:** 热防护结构; 隔热-承载一体化; 拓扑优化; 瞬态热传导; 最高温度控制

中图分类号: O189.1; O302

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2022)02-0142-08

## 1 引言

热防护技术是高超声速飞行器结构设计成败的关键要素<sup>[1]</sup>。为满足在不断缩小的设计空间内实现更加苛刻的轻量化需求, 迫使传统的热防护层+冷结构设计方案向一体化的隔热-承载多功能结构设计方案发展<sup>[2,3]</sup>。已有研究表明在相同的载荷工况下, 隔热与承载多功能结构设计方案比传统设计方案减重最高达 48.3%<sup>[4]</sup>。然而, 由于高承载材料隔热能力非常差(如金属), 一体化承载-隔热多功能结构存在显著的热短路效应<sup>[5]</sup>, 使得满足高承载的同时难以满足隔热性能。因此, 发展系统的隔热-承载的多功能设计方法以及最大程度协同承载与隔热的矛盾, 至关重要<sup>[6]</sup>。

内部填充隔热的波纹夹芯面板结构是目前研究最多的一体化隔热-承载多功能结构<sup>[7-9]</sup>。为实现防热功能与承载功能的协同, 出现了多种改进设计方案。一是将腹板镂空, 减少热短路效应, 但为了保持结构的承载能力, 在腹板的垂直方向增加了加强筋。二是将腹板与底面板均设计成夹芯板, 即多层级波纹夹芯结构。利用夹芯板的抗屈曲、高刚度和强度特性, 可使该种方案具有良好的承力性

能。同时在夹芯板中填充隔热材料, 可以降低腹板与底面板的导热系数。第三种改进方案是设计成双层波纹板, 通过更多的参数设计, 在保持性能要求的同时能够实现减重<sup>[10]</sup>。以上研究表明, 通过合理的结构设计, 能够实现承载与隔热的功能协同。

拓扑优化可以通过合理设计给定区域内材料的分布自动获得创新结构构型。拓扑优化经过几十年的发展, 已经形成了多种实现方法, 包括 SIMP 法<sup>[11-15]</sup>、渐进结构优化方法<sup>[16-18]</sup>、水平集方法<sup>[19-23]</sup>和移动组件法<sup>[24,25]</sup>等, 并成功应用于结构力学、传热、电磁和声学等多个物理场<sup>[26,27]</sup>。传热与承载的多功能结构设计也备受关注。如 De Kruif 等<sup>[28]</sup>提出了一种多目标结构拓扑优化方法, 讨论了结构刚度与热传导性能两个相互冲突的设计原则。Long 等<sup>[29]</sup>以结构质量最小为优化目标, 同时考虑了承载能力和隔热性能, 建立了宏微观一体化设计。Kambampati 等<sup>[30]</sup>建立了考虑应力和温度的结构拓扑优化方法, 指出应力和温度约束对柔顺性最小的拓扑优化结果有很大影响。Giraldo-Londoño 等<sup>[31]</sup>同时考虑承载与传热为设计目标, 建立了多材料的拓扑优化模型。Das 等<sup>[32]</sup>建立了以孔隙率和孔径为设计参数, 考虑承载和传热的梯度多孔结构拓扑优化模型。Yang 等<sup>[33]</sup>针对一体化的隔热承载多功能热防护结构进行了拓扑优化设计, 同时考虑了热力约束。以上研究均考虑了传热与承载存在一定的矛盾, 研究结果表明拓扑优化能够合理

收稿日期: 2020-10-16; 修改稿收到日期: 2021-03-20.

基金项目: 国家自然科学基金(U1808215; 11972105); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

作者简介: 刘书田\*(1962-), 男, 教授, 博士生导师  
(E-mail: stliu@dlut.edu.cn).

地进行两者的协同。但现有工作均集中于承载与稳态热传导性能为目标的结构设计,未充分考虑瞬态效应的影响。

实际工程中的隔热结构往往要求是在一定时间要求下的隔热。如10马赫的飞行器飞行1万公里用时不足1小时。隔热结构只要能够在工作时间内阻止外部产生的热量传入内部即可。因此,隔热结构的设计必须考虑时间要素。已有的研究表明,与稳态热传导不同,瞬态热传导结构的最优拓扑结果与时间紧密相关,存在显著的瞬态效应<sup>[34]</sup>。Wu等<sup>[35]</sup>已经建立了以区域温度控制函数作为目标的瞬态热传导结构的优化模型。通过最小化特定位置的温度,可以实现在不同隔热时间要求条件下的最佳结构构型设计。然而,考虑瞬态效应的隔热性能与承载能力的功能协同还需要进一步的探讨。

本文的目标是研究建立考虑瞬态效应的承载多功能结构设计方法,探索瞬态效应对隔热-承载多功能结构协同的影响。

## 2 拓扑优化方法

### 2.1 问题描述

如图1所示的热防护结构,为一层布置于外部环境与内部结构之间的承载隔热多功能结构,在 $S_1$ 表面上同时受到外力和热源的作用。为了防止外部热流流入内部结构,多功能结构中布置了隔热材料,同时为了承受一定的力载荷,结构中还需要承载材料。由于承载隔热多功能结构在 $x$ 方向的尺寸往往远大于在 $y$ 方向的尺寸,所以本文选取其中一段进行研究,如图1虚线包围的范围。其中 $S_2$ 和 $S_3$ 表面认为是周期性边界,分析时可作为绝热边界; $S_4$ 表面与内部结构相接触,其上温度与流出的热流依赖于内部结构的性质。在内部结构未知的情况下,内部结构的不确定造成热防护结构设计困难。实际上,如果忽略其流出的热量,则获得的热防护结构的设计将是保守的。为了简化设计问题,同时也能保证设计的方案是满足要求的,本文将 $S_4$ 边界视作绝热边界。

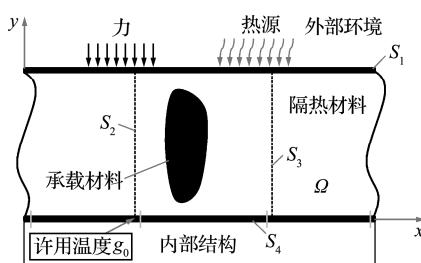


图1 承载隔热多功能结构  
Fig. 1 Multi-functional structures

如果不考虑结构的隔热能力,热流会经由承载材料流入内部结构,从而产生过高的温度。因此 $S_4$ 区域的最高温度不允许超过许用温度。如果不考虑结构的承载要求,在结构中间设置隔热层,由于隔热材料的承载能力不足,结构会发生机械破坏。因此,如何设计一种合理的结构,能够在保证隔热要求的同时最大化其承载性能,是本文研究的目的。

结构的受力过程可通过静力学性能描述。其基于有限元方法的离散形式的控制方程可表示为

$$\mathbf{K}_s \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (1)$$

式中  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{F}$  分别为全局位移和力向量,  $\mathbf{K}_s$  为全局刚度矩阵。

对于传热问题,需要考虑瞬态效应。离散形式的瞬态热传导的控制方程为

$$\mathbf{C} \dot{\mathbf{T}} + \mathbf{K}_t \mathbf{T} = \mathbf{P} \quad (2)$$

式中  $\mathbf{C}$  为热容矩阵,  $\mathbf{K}_t$  为热导率矩阵,  $\mathbf{P}$  为外加载荷向量,  $\mathbf{T}$  为节点温度向量,  $\dot{\mathbf{T}}$  为节点温度对时间的导数向量。

### 2.2 拓扑优化模型

对于静力学结构优化问题,本文选取柔顺性作为结构承载性能的描述指标,柔顺性越小表明结构刚度越大,其定义为

$$c = \mathbf{U}^T \mathbf{K}_s \mathbf{U} \quad (3)$$

对于瞬态热传导结构的优化,关心区域  $\Omega_c$  内的最高温度可以作为隔热性能的评价指标,如图1中 $S_4$ 边界上的最高温度。但最高温度点的位置会随着材料分布的变化而变化,因此在某些情况下,最高温度作为材料分布的函数是非连续的,而这种非连续性往往使优化问题的求解变得困难。因此,直接以最高温度作为目标或约束函数是不可取的。根据最大函数的光滑逼近理论,最高温度可以近似表示为一个温度控制函数,称为区域温度控制函数,其形式为

$$g = \frac{\int_0^{t_f} \xi(t) a^{\xi(t)} dt}{\int_0^{t_f} a^{\xi(t)} dt} \quad (4)$$

$$\xi(t) = \int_{\Omega_c} T(x, t) a^{T(x, t)} dx / \int_{\Omega_c} a^{T(x, t)} dx$$

式中  $\xi(t)$  为某一时刻温控区域  $\Omega_c$  内最高温度的近似,  $g$  则是整个工作时间内温控区域  $\Omega_c$  内最高温度的近似。 $a$  为大于1的正常数,且当  $a \rightarrow +\infty$  时,  $\xi(t) \rightarrow \max(T(x, t))$ ,  $g \rightarrow \max(T(x, t))$ 。

由于对结构进行了有限元离散,  $\xi(t)$  的积分形式可以由温控区域  $\Omega_c$  内有限个网格点的温度近似表示为

$$\xi(t) \approx \sum_{i=1}^{N_c} T_{n_i}(t) a_{n_i}^T(t) / \sum_{i=1}^{N_c} a_{n_i}^T(t) \quad (5)$$

式中  $N_c$  为温控区  $\Omega_c$  内网格节点的总数,  $n_i$  为温控区内整个网格中第  $i$  个网格点的节点号,  $T_{n_i}(t)$  为某一时刻  $n_i$  节点处的温度。

以柔顺性为目标, 区域温度控制函数为约束函数, 基于有限元形式描述的优化模型为

$$\text{Find: } \mathbf{X} = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_e, \dots, \rho_{N_e})$$

$$\text{Min: } c(\mathbf{X}) = \mathbf{U}^T \mathbf{K}_s \mathbf{U}$$

$$\text{Sub: } g(\mathbf{X}) \leq g_0$$

$$\mathbf{K}_s \mathbf{U} = \mathbf{F}$$

$$\mathbf{C} \dot{\mathbf{T}} + \mathbf{K}_T \mathbf{T} = \mathbf{P}$$

$$\frac{1}{A} \sum_{e=1}^{N_e} A_e \rho_e = \phi$$

$$0 < \rho_{\min} < \rho_e \leq 1 \quad (6)$$

式中  $\rho_e$  为第  $e$  个单元的单元密度,  $g_0$  为给定的许用温度,  $\phi$  为指定的体积分数,  $A_e$  为每个单元的体积,  $A$  为设计域的总体积。

本文采用基于梯度的优化算法求解式(6)的优化模型, 因此, 敏度信息是非常重要的。目标函数  $c(\mathbf{X})$  关于设计变量的灵敏度为

$$\frac{\partial c(\mathbf{X})}{\partial \rho_e} = -p'(\rho_e)^{p'-1} \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_0 \mathbf{u}_e \quad (7)$$

式中  $\mathbf{u}_e$  和  $\mathbf{k}_e$  分别为单元位移向量和刚度矩阵,  $p'$  为惩罚因子(通常  $p' = 3$ )。关于推导的更多细节, 可以参考文献[15]。

约束函数  $g(\mathbf{X})$  关于设计变量敏度的显式解析表达式可以表示为

$$\frac{\partial g(\mathbf{X})}{\partial \rho_e} = \int_0^{t_f} \left( \mathbf{l}^T \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \rho_e} \dot{\mathbf{T}} + \mathbf{l}^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho_e} \mathbf{T} \right) dt \quad (8)$$

式中 拉格朗日乘子  $\mathbf{l}$  可通过伴随状态方程(9)求解得到, 即

$$\dot{\mathbf{C}} \mathbf{l} + \mathbf{K} \mathbf{l} = -\beta(t_f - t') \mathbf{A}^T \chi^T, \mathbf{l}|_{t'=0} = 0 \quad (9)$$

详细推导过程可以参考文献[35]。

### 3 算例

为了验证拓扑优化模型的有效性, 本文设计了两个不同载荷和边界条件的算例。两个算例均为如图 2 所示的方形结构, 大小为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。使用的材料 Mat-1 为气凝胶, 具有较低的热导率, 而且其弹性模量为 0, 不具有承载性能; 材料 Mat-2 为钛合金, 具有较高的承载能力, 但是热导率较高, 占总面积的 30%, 具体参数列入表 1。整个结构的初始温度为  $0^\circ\text{C}$ 。

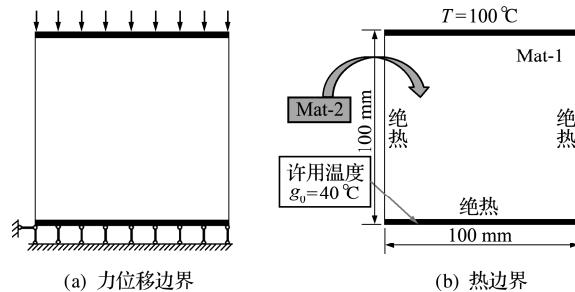


图 2 算例 1 的力位移边界和热边界条件  
Fig. 2 Boundary conditions in example 1

表 1 使用材料的材料属性

Tab. 1 Properties of the used materials

	Thermal conductivity $\text{W/m}\cdot\text{°C}$	Heat capacity $\text{J}/\text{°C}\cdot\text{m}^3$	Young's modulus $/\text{GPa}$	Poisson's ratio
Mat-1	0.034	$1.21 \times 10^5$	0	0.3
Mat-2	7.30	$2.49 \times 10^6$	110	0.3

### 3.1 固定温度热源和均布载荷底面支承

方形结构上边界受到均匀的压力, 下边界固定竖直方向的位移, 左右两端为周期性边界条件, 如图 2(a)所示。同时上方的热源为  $100^\circ\text{C}$  的固定温度, 其余三边绝热, 如图 2(b)所示, 假设热源工作时间为 2000 s, 讨论不同许用温度  $g_0 = (100^\circ\text{C}, 55^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}, 45^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C})$  下的最优结构设计。

图 3 给出了在许用温度为  $40^\circ\text{C}$  时, 整个拓扑优化过程柔顺性和底面最大温度的迭代曲线。可以看出, 本文方法达到收敛的过程是平滑的, 柔顺性随着优化迭代不断降低, 并很快达到收敛, 底面最大温度随着优化迭代一开始是不断上升的, 当最大温度达到  $40^\circ\text{C}$  时就趋于平缓, 许用温度约束达到上限。整个迭代过程表明, 求解方法有效, 求解过程收敛性好。

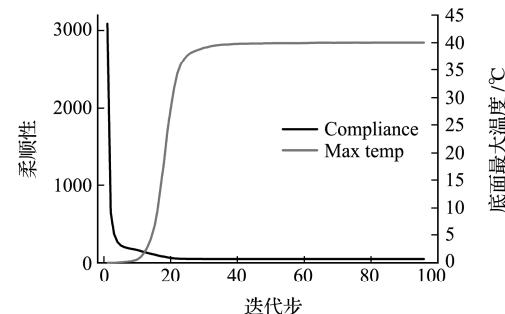


图 3 柔顺性和底面最大温度迭代曲线  
Fig. 3 Iterative curve of compliance and bottom maximum temperature

为讨论瞬态效应引起的结构拓扑形式的变化, 表 2 列出了五种不同许用温度约束下获得的结构

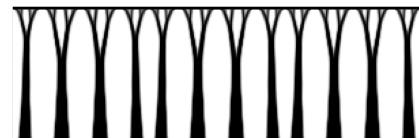
拓扑、最终时刻的温度场、底端最大温度和结构柔顺性。由表 2 可知,不同许用温度获得了不同的拓扑优化结果。值得注意的是,当许用温度为 100 °C 时,最终拓扑的最大温度为 57.9 °C,此时温度约束并没有发挥作用,该模型退化为柔顺性最小问题。也就是说,当许用温度低于 57.9 °C 时,才会产生瞬态效应,隔热才会发挥作用。当许用温度从 55 °C 逐渐减少到 40 °C 时,结构拓扑也发生显著的变化。主要体现在两个方面,一是主要承力结构在载荷端呈现树枝状分布,枝干部分由上往下由细变粗,这样可以减少流入的热流;二是结构分布变得规则,这使得热流往下流的过程中,可以经过尽可能多的隔热材料,从而将热量暂时保存在隔热材料中。对比拓扑在最终时刻的温度场分布可以发现,温度场中的红色高温区域逐渐上移,且结构底端趋向于均匀温度,在水平方向不会出现温差较大的区域。图 4 给出了许用温度为 100 °C 和 40 °C 两种拓扑结构在  $x$  方向  $3 \times 1$  的阵列结构。

表 2 不同许用温度下获得的最优拓扑的性能  
Tab. 2 Performance of the optimized topologies under different allowable temperature

$g_0$ /°C	拓扑	最终时刻 温度场	底面最大 温度/°C	柔顺性
100			57.9	43.48
55			54.9	43.51
50			49.9	44.62
45			45.0	45.93
40			40.01	49.17



(a) 只考虑承载性能



(b) 考虑瞬态隔热

图 4 许用温度为 100 °C 和 40 °C 两种情况下得到的拓扑的阵列

Fig. 4 Array diagram of two kinds of topologies under 100 °C and 40 °C

从底面最大温度看,许用温度约束均达到约束的上限,结构满足隔热性能要求;同时,由于许用温度的减少,也就是隔热能力的要求提高,结构柔顺性也逐渐增大,即结构的刚度逐渐降低。这些结果说明,为了满足结构的隔热性能,需要牺牲一定的承载性能,且隔热性能要求越严苛,承载性能下降越多。另外,对五种拓扑结果进行分析,图 5 给出了底面最大温度随时间的变化曲线,对五种拓扑结果的对比表明,不考虑隔热的设计方案(许用温度为 100 °C),在大约 1500 s 时就到达了 40 °C,比严格控制隔热性能的设计方案(许用温度为 40 °C),提前了约 500 s,但刚度损失约 13%。以上结果证明,该优化模型能够实现结构承载与隔热功能的协同设计。

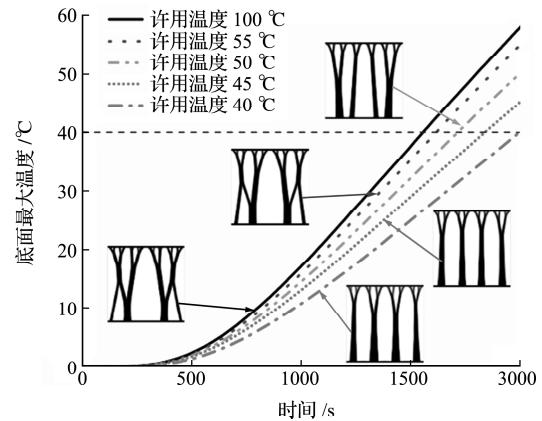


图 5 五种拓扑结构底面最大温度随时间变化

Fig. 5 Curve of bottom maximum temperature of five topologies with time

### 3.2 固定热流热源和均布载荷两端简支

第二个算例中方形结构上边界受到均布载荷,下边界两端简支,左右两端为周期性边界条件,如图 6(a) 所示。同时上方的热源是固定热流边界 0.01W,其余三边绝热,如图 6(b) 所示。假设底端

的许用温度为  $g_0=60^{\circ}\text{C}$ , 讨论不同热源工作时间(850 s, 900 s, 950 s, 1000 s)的最优拓扑结构设计。

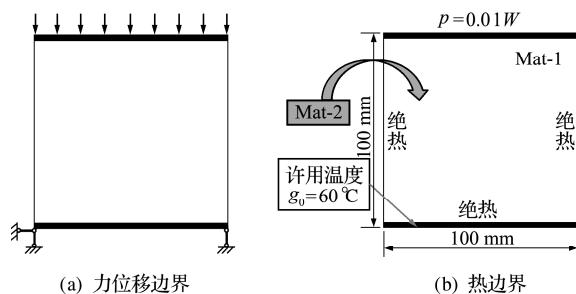


图 6 算例 2 的力位移边界和热边界条件  
Fig. 6 Boundary conditions in example 2

图 7 给出了在工作时间为 1000 s 时, 整个拓扑优化过程柔顺性和底面最大温度的迭代曲线。可以看出, 本文方法达到收敛的过程是平滑的, 柔顺性随着优化迭代不断降低, 并很快达到收敛, 底面最大温度随着优化迭代一开始是不断上升的, 当最大温度达到 60 °C 时就趋于平缓, 许用温度约束达到上限。整个迭代过程表明, 求解方法有效, 求解过程收敛性好。

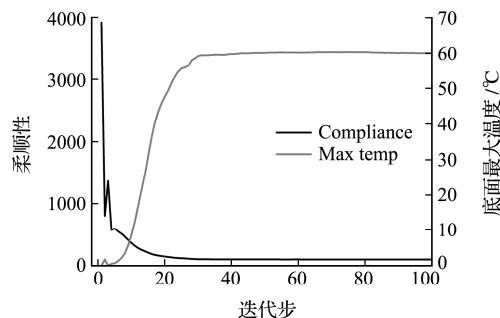


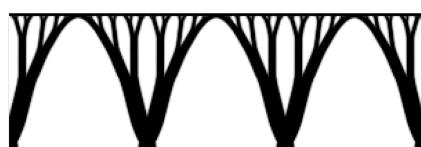
图 7 柔顺性和底面最大温度迭代曲线  
Fig. 7 Iterative curve of compliance and bottom maximum temperature

表 3 给出了不同工作时间条件下得到的结构拓扑、最终时刻的温度场、底端最大温度和结构柔顺性。值得注意的是, 当工作时间足够短(850 s)时, 最终拓扑的底面温度为 57.5 °C, 小于许用温度 60 °C, 说明此时许用温度约束不发挥作用, 拓扑优化结果为柔顺性最小的设计。随着工作时间的增加, 拓扑结果主要发生两个方面的变化, 一是主要承力结构与载荷端的接触面积不断变少, 枝干部分由上往下由细变粗, 拱形结构不断下降, 这样可以减缓热流从上端往下流入。二是结构分布范围不断变大, 在热流往下流的过程中, 热流可以流入到隔热材料中。由于隔热能力的提高, 在水平方向的温度颜色由差异较大逐渐趋向于相同, 即温度分布逐渐趋向于均匀。从数值上来看, 在不同工作时间

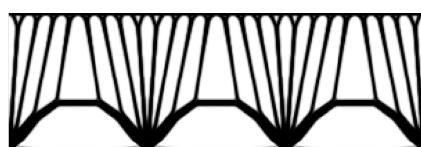
条件下, 许用温度约束均达到上限。随着需求的工作时间越长, 结构所需要的隔热能力也越强, 此时, 结构的柔顺性也随之升高, 即结构承载能力下降。图 8 给出了工作时间为 850 s 和 1000 s 两种拓扑结构在  $x$  方向  $3 \times 1$  的阵列结构。图 9 对四种拓扑结果的对比表明, 不考虑隔热的设计方案(工作时间为 850 s), 在 1000 s 时底面的最大温度达到了 82 °C, 比严格控制隔热性能的设计方案(工作时间为 1000 s)的最大温度高了 22 °C, 但刚度损失约 23%。四种设计方案的对比证明, 该优化模型能够实现结构承载与隔热功能的协同设计。

表 3 不同工作时间下获得的最优拓扑的性能  
Tab. 3 Performance of the optimized topologies under different working time

工作时间 /s	拓扑	最终时刻 温度场	底面最大 温度/°C	柔顺性
850			57.5	81.96
900			60.0	84.63
950			60.0	89.97
1000			60.0	100.81



(a) 只考虑承载性能



(b) 考虑瞬态隔热

图 8 工作时间为 850 s 和 1000 s 时得到的拓扑的阵列  
Fig. 8 Array diagram of two kinds of topologies under 850 s and 1000 s

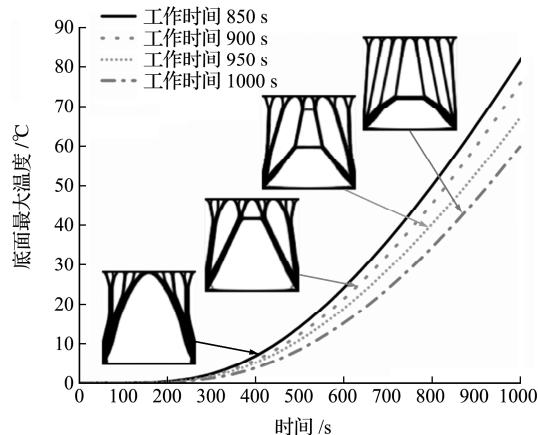


图9 四种拓扑结构底面最大温度随时间变化  
Fig. 9 Curve of bottom maximum temperature of four topologies with time

## 4 结 论

本文将静力优化中的柔顺性和瞬态热传导优化中的区域温度控制函数相结合,建立了以单元密度为设计变量,以结构柔顺性最小为目标函数,材料用量和区域温度控制函数为约束条件的优化模型,提出了一种考虑瞬态效应的面向承载-隔热多功能结构的拓扑优化方法。数值算例显示,对于固定温度和固定热流两种热源,均布压缩载荷和均布载荷两端简支两种载荷工况下,本文拓扑优化方法均能够得到满足隔热要求的承载结构,从而验证了本文方法的有效性。并且本文方法得到的拓扑结果能够精确满足不同许用温度和不同工作时间的隔热要求。

## 参考文献(References):

- [1] 杨强,解维华,彭祖军,等.热防护设计分析技术发展中的新概念与新趋势[J].航空学报,2015,36(9):2981-2991.(YANG Qiang, XIE Wei-hua, PENG Zu-jun, et al. New concepts and trends in development of thermal protection design and analysis technology [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(9): 2981-2991. (in Chinese))
- [2] Wei K, Cheng X M, Mo F H, et al. Design and analysis of integrated thermal protection system based on lightweight C/SiC pyramidal lattice core sandwich panel [J]. *Materials and Design*, 2016, 111: 435-444.
- [3] Xu Y J, Xu N X, Zhang W H, et al. A multi-layer integrated thermal protection system with C/SiC composite and Ti alloy lattice sandwich [J]. *Composite Structures*, 2019, 230: 111507.
- [4] Meng S H, Yang Q, Xie W H, et al. Comparative study of structural efficiencies of typical thermal protection concepts [J]. *AIAA Journal*, 2017, 55(7): 2476-2480.
- [5] Yang Q, Meng S H, Xie W H, et al. Effective mitigation of the thermal short and expansion mismatch effects of an integrated thermal protection system through topology optimization [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 118: 149-157.
- [6] Fang X W, Chen J, Lu B H, et al. Optimized design of sandwich panels for integral thermal protection systems [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2017, 55(1): 13-23.
- [7] 解维华,霍施宇,杨强,等.新型一体化热防护系统热力分析与试验研究[J].航空学报,2013,34(9):2169-2176.(XIE Wei-hua, HUO Shi-yu, YANG Qiang, et al. Thermal-mechanical analysis and test study of a new integrated thermal protection system [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34 (9): 2169-2176. (in Chinese))
- [8] 孟松鹤,杨强,霍施宇,等.一体化热防护技术现状和发展趋势[J].宇航学报,2013,34(10):1295-1302.(MENG Song-he, YANG Qiang, HUO Shi-yu, et al. State-of-arts and trend of integrated thermal protection systems [J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(10): 1295-1302. (in Chinese))
- [9] Meng S H, Yang Q, Xie W H, et al. Structure redesign of the integrated thermal protection system and fuzzy performance evaluation [J]. *AIAA Journal*, 2016, 54(11): 3598-3607.
- [10] Zhao S Y, Li J J, Zhang C X, et al. Thermo-structural optimization of integrated thermal protection panels with one-layer and two-layer corrugated cores based on simulated annealing algorithm [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2015, 51(2): 479-494.
- [11] Bendsøe M P, Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1988, 71(2): 197-224.
- [12] Bendsøe M P. Optimal shape design as a material distribution problem [J]. *Structural Optimization*, 1989, 1(4): 193-202.
- [13] Zhou M, Rozvany G I N. The COC algorithm—Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1991, 89(1-3): 309-336.
- [14] Sigmund O. A 99 line topology optimization code written in Matlab [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2001, 21(2): 120-127.
- [15] Bendsøe M P, Sigmund O. *Topology Optimization:*

- Theory, Methods, and Applications [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004.
- [16] Xie Y M, Steven G P. A simple evolutionary procedure for structural optimization [J]. *Computers & Structures*, 1993, **49**(5): 885-896.
- [17] Huang X D, Xie Y M. A further review of ESO type methods for topology optimization [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2010, **41** (5): 671-683.
- [18] Radman A, Huang X, Xie Y M. Topological optimization for the design of microstructures of isotropic cellular materials [J]. *Engineering Optimization*, 2013, **45** (11): 1331-1348.
- [19] Sethian J A, Wiegmann A. Structural boundary design via level set and immersed interface methods [J]. *Journal of Computational Physics*, 2000, **163** (2): 489-528.
- [20] Wang M Y, Wang X M, Guo D M. A level set method for structural topology optimization [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2003, **192**(1-2): 227-246.
- [21] Allaire G, Jouve F, Toader A M. Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method [J]. *Journal of Computational Physics*, 2004, **194**(1): 363-393.
- [22] Luo Z, Wang M Y, Wang S Y, et al. A level set-based parameterization method for structural shape and topology optimization [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2008, **76** (1): 1-26.
- [23] Wang Y Q, Luo Z, Kang Z, et al. A multi-material level set-based topology and shape optimization method [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2015, **283**: 1570-1586.
- [24] Guo X, Zhang W S, Zhang J, et al. Explicit structural topology optimization based on Moving Morphable Components (MMC) with curved skeletons [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2016, **310**: 711-748.
- [25] Guo X, Zhang W S, Zhong W L. Doing topology optimization explicitly and geometrically—A new moving morphable components based framework [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2014, **81**(8): 081009.
- [26] 刘川, 王奇, 高仁璟, 等. 基于拓扑与形状优化的小型化金属天线设计方法 [J]. 计算力学学报, 2019, **36**(6): 713-720. (LIU Chuan, WANG Qi, GAO Ren-jing, et al. Topology and shape optimization based method for miniaturization design of metallic antenna [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2019, **36**(6): 713-720. (in Chinese))
- [27] 薛日野, 杜宗亮, 郭旭. 基于移动可变形孔洞方法的超弹性结构拓扑优化 [J]. 计算力学学报, 2019, **36**(4): 441-447. (XUE Ri-ye, DU Zong-liang, GUO Xu. Topology optimization of hyperelastic structures via Moving Morphable Void (MMV) approach [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2019, **36**(4): 441-447. (in Chinese))
- [28] De Kruijf N, Zhou S W, Li Q, et al. Topological design of structures and composite materials with multiobjectives [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, **44**(22-23): 7092-7109.
- [29] Long K, Wang X, Gu X G. Concurrent topology optimization for minimization of total mass considering load-carrying capabilities and thermal insulation simultaneously [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2018, **34**(2): 315-326.
- [30] Kambampati S, Gray J S, Kim H A. Level set topology optimization of structures under stress and temperature constraints [J]. *Computers & Structures*, 2020, **235**: 106265.
- [31] Giraldo-Londoño O, Mirabella L, Dalloro L, et al. Multi-material thermomechanical topology optimization with applications to additive manufacturing: Design of main composite part and its support structure [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2020, **363**: 112812.
- [32] Das S, Sutradhar A. Multi-physics topology optimization of functionally graded controllable porous structures: Application to heat dissipating problems [J]. *Materials & Design*, 2020, **193**: 108775.
- [33] Yang Q, Gao B, Xu Z Y, et al. Topology optimisations for integrated thermal protection systems considering thermo-mechanical constraints [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, **150**: 995-1001.
- [34] 吴书豪, 张永存, 刘书田. 一种考虑瞬态效应的散热结构导热路径设计的拓扑优化模型 [J]. 计算力学学报, 2018, **35**(5): 547-551. (WU Shu-hao, ZAHNG Yong-cun, LIU Shu-tian. A topology optimization model for conducting paths design of cooling structures considering transient effect [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2018, **35**(5): 547-551. (in Chinese))
- [35] Wu S H, Zhang Y C, Liu S T. Topology optimization for minimizing the maximum temperature of transient heat conduction structure [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2019, **60**(1): 69-82.

## Topology optimization for multi-functional structure with both load-bearing and thermal insulation capability considering transient effect

WU Shu-hao, ZHANG Yong-cun, LIU Shu-tian\*

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** A multi-functional structure, which can meet the requirements of load-bearing and thermal insulation simultaneously, has attracted much attention in the design of hypersonic thermal protection structures. The load-bearing capacity of thermal insulation materials is weak, while the thermal insulation capacity of load-bearing materials is poor. How to balance the load-bearing and thermal insulation requirements in a limited space has become a key problem. The aerodynamic heating time of hypersonic aircraft is limited, which has the characteristics of short heating time and large variation of thermal load. Therefore, the influence of time and transient effect needs to be considered in structural design, but the existing multi-functional collaborative optimization design model of steady heat conduction and load-bearing cannot solve the above problems. In this paper, the design model and solution method of topology optimization for multi-functional structures with both load-bearing and thermal insulation capability considering transient effects are established, and the analytical sensitivity calculation format of the objective and constraints is given. Based on the density method and considering the volume constraint, this method takes the minimum structural compliance as the design objective and the regional temperature control function as the design constraint to achieve the multi-functional design requirements of structural stiffness and thermal insulation. Numerical examples show that the proposed optimization model can accurately consider the transient effect of the structure, and realize the multi-functional coordination of load-bearing and thermal insulation design under the given allowable temperature and working time.

**Key words:** thermal protection structure; integration design of thermal insulation and load-bearing; topology optimization; transient heat conduction; maximum temperature control

---

引用本文/Cite this paper:

吴书豪,张永存,刘书田. 考虑瞬态效应的承载隔热多功能结构拓扑优化[J]. 计算力学学报,2022,39(2):142-149.

WU Shu-hao, ZHANG Yong-cun, LIU Shu-tian. Topology optimization for multi-functional structure with both load-bearing and thermal insulation capability considering transient effect[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, 39(2): 142-149.